Energy, Mines and Resources Canada | Energie, Mines et Ressources Canada

CANMET

Canada Centre for Mineral and Energy Technology | Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie

ETUDE DES DESCENDANTS DU RADON FIXES AUX AEROSOLS DE TAILLE SOUS-MICRONIQUE

M.G. GRENIER ET J. BIGU

ELLIOT LAKE LABORATOIRE

AVRIL 1984

This document is an unedited interim report prepared primarily for discussion and internal reference purposes. It does not represent a final expression of the opinion of the Canada Centre for Mineral and Energy Technology (CANMET)

Ce document est un rapport provisoire non-révisé et rédigé principalement pour fin de discussion et de documentation interne. Il ne représente aucunement l'expression définitive de l'opinion du Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie (CANMET)

27 pp

MICROMEDIA

JUL 20 1984

PROGRAMME DE RECHERCHE SUR L'ENERGIE ET LES MINERAUX
LABORATOIRES DE RECHERCHE MINIERE
RAPPORT DE DIVISION PRE/PRM/LRM 84-38(TR)F

ETUDE DES DESCENDANTS DU RADON FIXES AUX AEROSOLS DE TAILLE SOUS-MICRONIQUE

par

M.G. Grenier* et J. Bigu**

RESUME

Cette étude est une analyse des effets de la concentration et de la distribution granulométrique des noyaux de condensation ainsi que celle de l'humidité relative sur le niveau de travail (WL). Les essais furent realisés à l'intérieur d'une chambre de désintégration étanche ayant un volume de 3000 litres. Au cours de l'étude, plusieurs concentrations de noyaux de condensation furent utilisées, allant de 1×10^3 à 4.5×10^5 particules par cm^3. Les noyaux de condensation artificiels utilisés avait un diamètre aérodynamique de diffusion moyen de .025, .045 ou .095 µm. Ces études démontrent qu'il existe un lien entre le niveau de travail, et la concentration des noyaux de condensation, ainsi qu'entre le niveau de travail et l'humidité relative. La majeure partie des ions radioactifs semble se fixer aux noyaux de diamètre variant entre .05 et .2 µm.

* Chercheur, ** Chercheur et chef de la section de rayonnement au laboratoire d'Elliot Lake, CCTME, Energie, Mines et Ressources Canada, Elliot Lake, Ontario, Canada P5A 2J6.

ON THE ATTACHMENT OF DECAY PRODUCTS OF RADON TO AEROSOLS IN THE SUBMICRON RANGE

by

M.G. Grenier* and J. Bigu**

ABSTRACT

A study of the effects of aerosol concentration, aerosol size distribution and relative humidity on the Working Level and the radon daughter concentration was conducted in a 3000 L radon environmental chamber. Typical values of the aerosol concentration varied in the 1 x 10^3 particles/cm^3 to 4.5 x 10^5 particles/cm^3 range. Various size distributions of aerosols that have mean diffusional aerodynamic diameters of .025 μm, .045 μm and .090 μm were tested. A good correlation was found between the Working Level and the aerosol concentration as well as the relative humidity. Most of the activity seems to be associated with particles of diameter between .05 μm and .2 μm. The results presented here are in agreement with work done by other investigators in the health physics field.

---

* Physical Scientist, ** Research Scientist and Radiation Project Leader, Elliot Lake Laboratory, CANMET, Energy, Mines and Resources Canada, Elliot Lake, Ontario, Canada P5A 2J6.

TABLE DES MATIERES

	page
RESUME	i
ABSTRACT	ii
INTRODUCTION	1
DESCRIPTION DE L'APPAREILLAGE	3
METHODE	7
RESULTATS ET ANALYSE	9
Effet de la concentration des noyaux de condensation	9
Effet de l'humidité relative	13
Effet des changements de distribution granulométrique	16
CONCLUSION	21
BIBLIOGRAPHIE	21

FIGURES

no.		
1.	Schéma de la chambre de désintégration et de l'appareillage connexe	4
2.	Concentration du radon [Rn], des noyaux de condensation (N) et le niveau de travail (WL) en fonction du temps	10
3.	Niveau de travail (WL) en fonction de la concentration des noyaux (N)	11
4.	Fraction libre (théorique) de RaA en fonction de la concentration des noyaux de condensation	12
5.	Concentration des descendants du radon [RaA], [RaB] et [RaC] ainsi que celle des noyaux de condensation en fonction du temps	14
6.	Niveau de travail (WL) et humidité relative (h.r.) en fonction du temps	15
7.	Diamètre moyen des noyaux de condensation en fonction de la molarité des solutions d'NaCl employées dans l'atomiseur	18
8.	Niveau de travail (WL) en fonction du diamètre moyen des noyaux de condensation	19
9.	Spectre en taille des aérosols radioactifs d'une mine d'uranium	20

TABLEAUX

1.	Résumé des données durant les essais 1 à 6	8
2.	Données utilisées pour la construction du graphique à la figure no. 8	17

INTRODUCTION

Le radon (Rn-222) est formé à partir de la chaine radioactive naturelle de l'uranium (U-238). A la suite de plusieurs désintégrations l'U-238 est transformé en radium (Ra-226), qui à son tour à la suite d'un rayonnement alpha se transforme en radon. Les descendants à période courte du radon, c'est à dire le Po-218 (RaA), le Pb-214 (RaB),le Bi-214 (RaC) et le Po-214 (RaC') sont des métaux lourds tandis que leur parent est un gaz inerte. De ce fait même, on peut déduire que la désintégration du radon dans les galeries d'une mine produira le RaA radioactif sous forme d'ion libre et en suspension. Le RaA et les trois descendants suivants sont reconnus comme étant un danger pour les voies respiratoires des travailleurs de l'industrie de l'uranium.

Du fait que le RaA est produit sous forme d'ion libre on peut déduire que son parcours dans l'air sera grandement affecté par le phénomène de diffusion. En autres mots le coéfficient de diffusion du RaA sous forme libre est assez élevé puisque ce coéfficient est relié à la mobilité qui à son tour est fonction (en relation inverse) de la taille de l'ion. A la suite de travaux sur l'étude de la diffusion d'ions de thallium dans un milieu d'azote pur, Chamberlain et Dyson (1) ont déduit que le RaA a un coéfficient de diffusion de .054 cm^2/s sous ces conditions. En se servant de batteries de diffusion, Raabe (2) déduit que le RaA a un coéfficient de diffusion (D) de .047 et de .034 cm^2/s dans un milieu où l'humidité relative est de 15% et 33% respectivement. Plus récemment, Busigin et al. (3) ont demontré que D pour un ion libre de RaA peut se situer entre .005 et .1 cm^2/s dépendant des caractéristiques chimiques de l'ion au moment où D est mesuré. Ces faits semblent être appuyés par la recherche de Frey et al. (4).

Puisque le RaA est un métal lourd et à cause du fait que son coéfficient

de diffusion est élevé, celui-ci a tendance à vouloir se fixer à toute surface disponible. Ces surfaces peuvent être fixes comme par exemple les murs de galeries de mines et ceux d'appareils scientifiques ou mobiles, tels des noyaux de condensation. Il est aussi possible que le RaA demeure sous forme libre (non-fixée) si la concentration des noyaux de condensation est basse et que les murs (surfaces fixes) sont eloignés. La destinée du RaB est liée de près à celle du RaA, puisque si le RaA est sous forme libre, le résultat sera de produire un ion de RaB libre après le rayonnement alpha. Dans le cas d'un ion de RaA fixé à un noyau de condensation, l'énergie de recul aura probablement comme conséquence la libération du RaB. Si le RaA est fixé à un mur, et sachant que l'énergie de recul ne permet qu'une portée de .1 mm dans l'air il est tout probable que l'ion de RaB se refixera au mur. Les différents cas possibles sont revus en plus de détails par Holub et Droullard (5).

L'étude de l'adhésion d'ions radioactifs aux murs ainsi qu'aux noyaux de condensation est grandement simplifiée par l'usage de chambres de désintégration (2,6). Ces deux modes d'adhésion bien que fondamentalement semblables ont des effets tout à fait contraires en ce que concerne la concentration d'aérosols radioactifs dans l'air. En effet le phénomène d'adhésion aux murs a pour effet de réduire la concentration d'aérosols radioactifs dans l'air (5,7,8,9,10,11,12). L'addition de noyaux de condensation à un système fermé cependant, augmente la concentration d'aérosols radioactifs dans l'air en réduisant la mobilité des ions radioactifs qui s'y fixent. Le coéfficient de diffusion du RaA peut passer de .05 cm^2/s à 3.0×10^{-6} ou 30.0×10^{-6} cm^2/s après que celui-ci se soit fixé à un noyau de condensation.

La distribution granulométrique des noyaux de condensation semble avoir un effet sur le phénomène d'adhésion. Plusieurs études furent faites qui démontrent que l'activité alpha provient principalement de descendants du

radon fixés à des noyaux de diamètres variant entre .1 et .2 µm. Madelaine (15) et Raabe (16) ont résumés plusieurs études qui démontrent que dans les mines l'activité alpha provient d'aérosols de diamètre moindre que .2 ou .3 µm.

Ce travail a pour but l'étude des phénomènes qui entrainent des changements de concentration des descendants du radon et du niveau de travail (WL). Plus particulièrement, l'effet de l'humidité relative, de la concentration des noyaux de condensation ainsi que leur taille est étudié dans une chambre de désintégration. La chambre en question a été conçue et assemblée au laboratoire d'Elliot Lake de CCTME, Energie, Mines et Ressources Canada (13).

DESCRIPTION DE L'APPAREILLAGE

Les dimensions internes de la chambre sont de 1.2 x 1.2 x 1.8 m ce qui veut dire un volume d'environ 2800 L. Un schéma de la chambre se trouve à la figure 1. Un squelette en aluminium supporte les six panneaux de Plexiglass qui forment les murs de la chambre. Un composé à base de silicone est employé afin d'assurer l'étanchéité de la chambre que l'on garde sous pression négative afin de réduire les chances de fuites de gaz radioactifs. On peut lire cette différence de pression à l'aide d'un manomètre à tube en U ou un autre plus précis à tube incliné.

La source de radon se trouve à l'extérieur de la chambre et est manufacturée par Pylon Electronic Development, Canada. Cette source consiste en un échantillon sec de Ra-226 (aproximativement 20.4 µCi) monté sur une surface poreuse au travers de laquelle on pompe l'air qui a été deshydraté auparavant. L'air est ensuite filtré avant d'être injecté dans la chambre; de cette façon l'échantillon est de radon pur. Le gaz radon est injecté dans la chambre au travers d'un réseau de tuyaux de cuivre qui est disposé le long du périmètre du plancher de la chambre. Des trous de .5 mm de diamètre sont

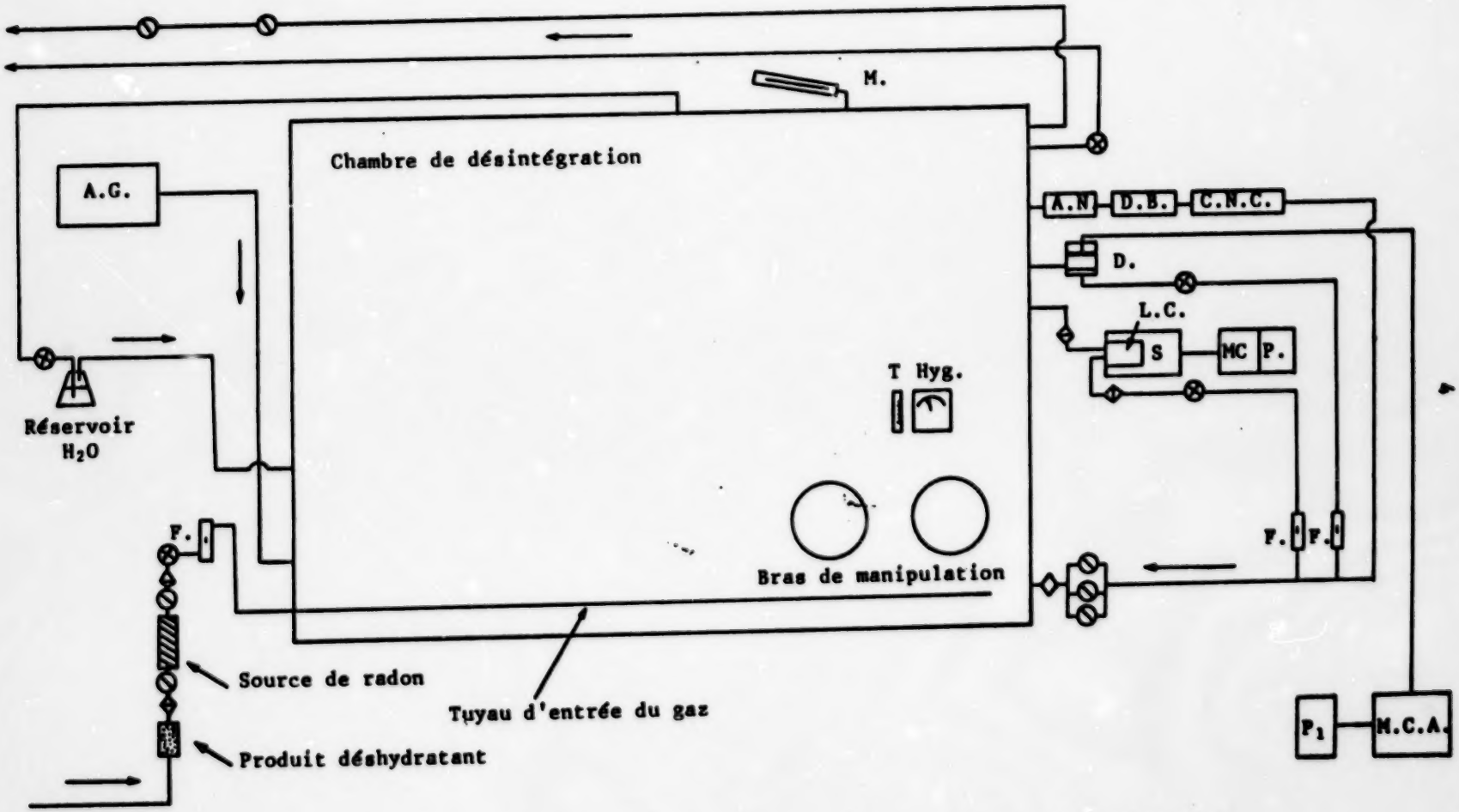

Fig. 1 - Schéma de la chambre de désintégration et de l'appareillage connexe (voir légende).

LEGENDE

T.	Thermomètre
S.	Compteur
F.	Débitmètre
P.	Imprimante
Hyg.	Hygromètre
P_1	Imprimante et appareil de restitution graphique
A.G.	Atomiseur et appareils connexes
D.B.	Batterie de diffusion
M.C.A.	Analyseur multicanal
C.N.C.	Compteur de noyaux de condensation
A.N.	Neutralisateur de charges
L.C.	Flasque de scintillation
M.C.	Micro-ordinateur
D.	Ensemble filtre-détecteur

Légende des symboles utilisés à la Fig. 1.

placés à intervalles réguliers de 10 cm tout le long du tuyau; ceci afin d'assurer une distribution homogène du radon. A la sortie, l'air passe au travers d'un tuyau de cuivre semblable à ceux décris plus haut mais placé au plafond de la chambre. Un ventilateur de type 'cage d'écureuil' sert à garder la pression négative de l chambre. Le taux d'échappement ainsi que la pression négative sont controllés à l'aide d'une soupape principale et d'une valve à purger secondaire. Le dosage du radon se fait à l'aide d'un instrument qui fonctionne de façon continue. Cet appareillage consiste en un flasque de scintillation au travers duquel on fait passer un échantillon de l'air de la chambre de façon continue. Le procédé d'étalonnage de ce flasque est décrit ailleurs (17). Le flasque est utilisé en conjonction avec un compteur manufacturé par Pylon (modèle RM-1003). Cet instrument est controllé par micro-ordinateur. Le dosage des descendants du radon se fait à intervalles réguliers en obtenant un échantillon d'air qui est pompé au travers d'un filtre qui fait face à un détecteur à barrière de silicium (Ortec) qui lui est relié à un analyseur multicanal (M.C.A.).

La production de noyaux de condensation se fait au moyen d'appareils manufacturés par TSI (U.S.A.). Plus particulièrement l'appareillage consiste en un régulateur de pression (modèle 3074), un atomiseur à débit constant (modèle 3075), un dessicateur (modèle 3062) et un neutralisateur de charge (modèle 3012). Une orifice d'entrée permet à cet appareil de fournir à la chambre un débit constant de noyaux de condensation. Le réglage de la concentration et du spectre de taille se fait en variant la molarité de la solution à atomiser. Un compteur de noyaux de condensation (modèle 3020, TSI) ainsi qu'une batterie de diffusion (modèle 3040, TSI) servent à mesurer la concentration et le spectre en taille des aérosols.

La régulation de l'humitité relative (h.r.) se fait au moyen d'air

que l'on fait passer au travers d'un flasque contenant de l'eau distillée. L'h.r. peut varier entre 30 et 95% si l'eau est chauffée légèrement. La température de l'air est controllée en chauffant l'air d'entrée, l'eau ou les deux. Cependant, le fait que l'h.r. et la température soit étroitement reliées veut dire que ces deux variables ne peuvent être controllées de façon absolument indépendante. La chambre et les appareils qu'elle contient sont décrits plus longuement ailleurs (13).

METHODE

Au départ l'air humide et le radon sont injectés de façon continue sur une période de 24 à 36 heures. Après s'être assuré que la concentration du radon, l'humidité relative et la température sont stables, le dosage des descendants du radon ainsi que la détermination du niveau de travail peuvent débuter. Ceci se fait à l'aide d'un compteur Tri-Met (Canada) et de la méthode Thomas-Tsivoglou (18) et Kusnetz (19). L'échantillonnage se fait à tous les 30 minutes sur une période de 2 à 4 heures, ceci afin de s'assurer un relevé précis des variables (niveau de travail, concentration des descendants, distribution granulométrique et concentration d'aérosols radioactifs) avant l'injection des noyaux de condensation. Après que le processus d'injection des noyaux est commencé, le dosage des descendants du radon ainsi que la détermination des autres variables se fait à tous les quinze minutes de façon à être capable de suivre leurs profils en fonction du temps. Après que la concentration des noyaux (N) a cessé d'augmenter (environ 4 heures) l'atomiseur est débranché et l'échantillonnage se poursuit jusqu'à ce que N cesse de diminuer et se stabilise. Le tableau 1 résume les résultats obtenus au cours de plusieurs essais.

Tableau 1 - Résumé des données durant les essais 1 à 6.

Essai No.	Type de solution (molarité)	$Nx10^{-5}$, cm^{-3} de - à	h.r. % de - à	T(°C) de - à	WL de - à
1	Uranine	.00495 - 2.930	86.5 - 91.0	21.0 - 24.0	0.40 - 2.64
2	NaCl (17.110)	.00752 - 4.400	87.0 - 95.0	23.0 - 27.0	0.28 - 2.79
3	- *	-	77.0 - 87.0	23.2 - 23.5	0.47 - 1.36
4	NaCl (1.711)	.00615 - 2.100	85.6 - 89.9	20.5 - 26.0	0.58 - 2.55
5	NaCl (0.171)	.01900 - 0.905	85.6 - 87.4	22.0 - 25.8	1.17 - 2.60
6	NaCl (0.017)	.00664 - 0.330	74.3 - 75.2	22.6 - 25.5	1.01 - 2.00

* L'atomiseur ne fut pas utilisé durant cet essai.

RESULTATS ET ANALYSE

Effet de la concentration des noyaux de condensation

La fig. 2 résume les résultats de mesures faites durant l'essai no. 2. On y retrouve la concentration du radon ([Rn]) en coups par minute (cpm), le niveau de travail (WL) ainsi que N la concentration de noyaux de condensation. Ces noyaux sont produits en atomisant une solution de 17.11 m mol/L d'NaCl. La concentration du radon est pratiquement constante à environ 200 cpm à l'exception d'un effet de dilution quand l'atomiseur est mis en marche. Cette situation se corrige quand l'atomiseur est debranché. On voit que ceci a un effet parallèle sur le WL. Ce qui est plus frappant à la fig. 2 c'est l'augmentation dramatique du WL qui se produit aussitôt que commence l'injection de noyaux de condensation. Afin d'examiner ce phénomène de plus près, la fig. 3 nous montre le WL en fonction de N pour les essais 2 et 4. On s'aperçoit que pour des valeurs de N allant jusqu'à 3×10^3 cm^{-3}, le WL varie de façon quasi - linéaire. Dans un intervalle intermédiaire on observe une relation non-linéaire entre N et WL (N variant entre 3.0×10^3 et 7.0×10^3 cm^{-3}). Pour ce qui est des valeurs de N en excès de 7.0×10^3 cm^{-3}, le WL ne semble pas être trop affecté par la concentration de noyaux de condensation.

La relation complexe qui existe entre N et le WL peut être expliquée en parti par une diminution du coéfficient f_u (fraction libre ou non-fixée d'ions de RaA dans l'air) à mesure que la concentration de noyaux augmente. La fig. 4 nous montre un courbe théorique (11) de f_u en fonction de N pour un coéfficient d'attachement (22) de 8.46×10^{-5} cm^3/min. Entre 1.0×10^3 et 3.0×10^3 cm^{-3} la fraction libre varie de 75% à 45%; ceci correspond à la partie linéaire de la fig. 3. Dans l'intervalle entre 3.0×10^3 et 7.0×10^3 cm^{-3}, f_u passe de 45% à 30%. Ceci veut dire que lorsque N atteint une valeur d'environ 1×10^4 cm^{-3} ou plus, il ne reste environ que 20% d'ions de RaA sous

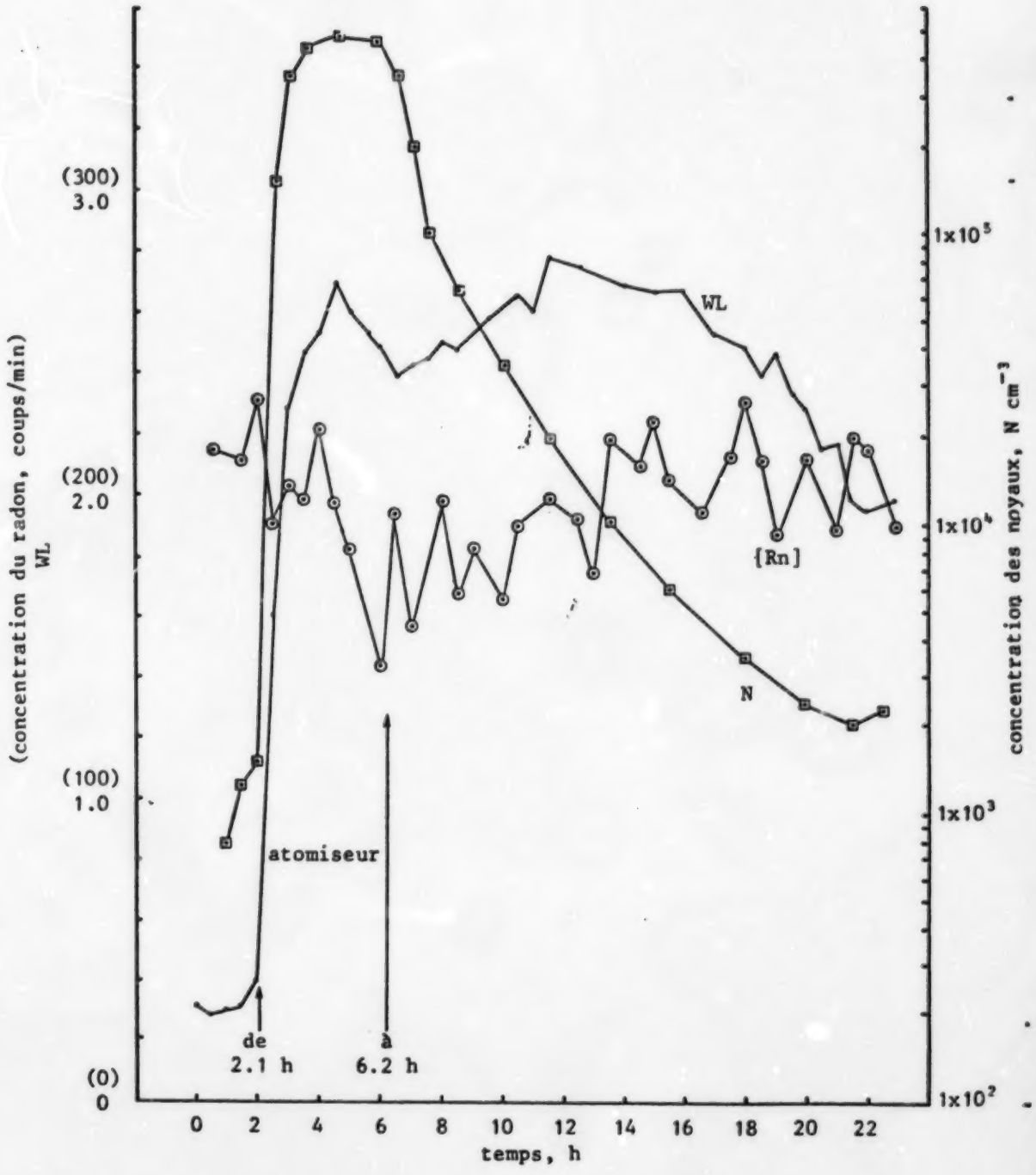

Fig. 2 - Concentration du radon [Rn], des noyaux de condensation (N) et le niveau de travail (WL) en fonction du temps.

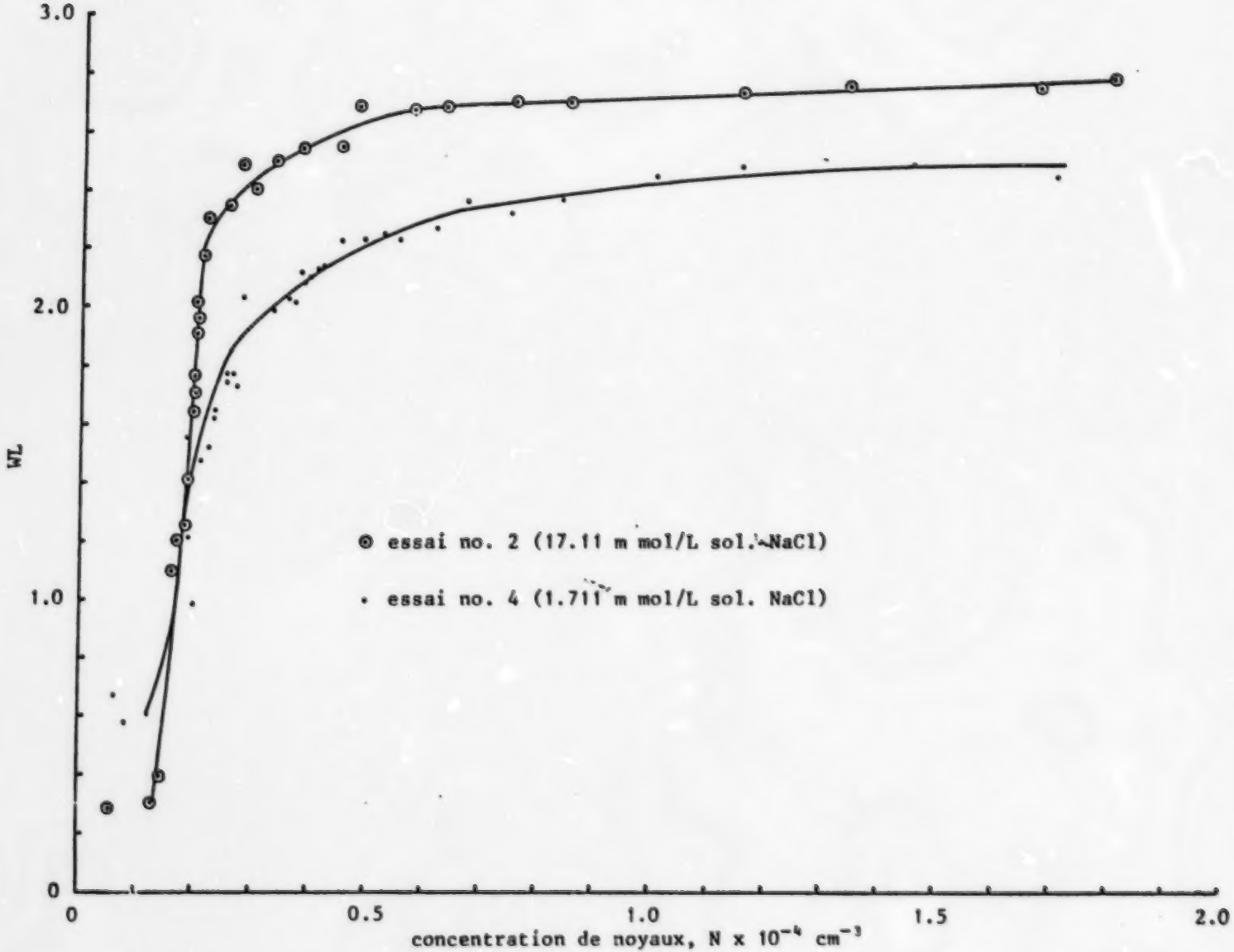

Fig. 3 - Niveau de travail (WL) en fonction de la concentration des noyaux (N).

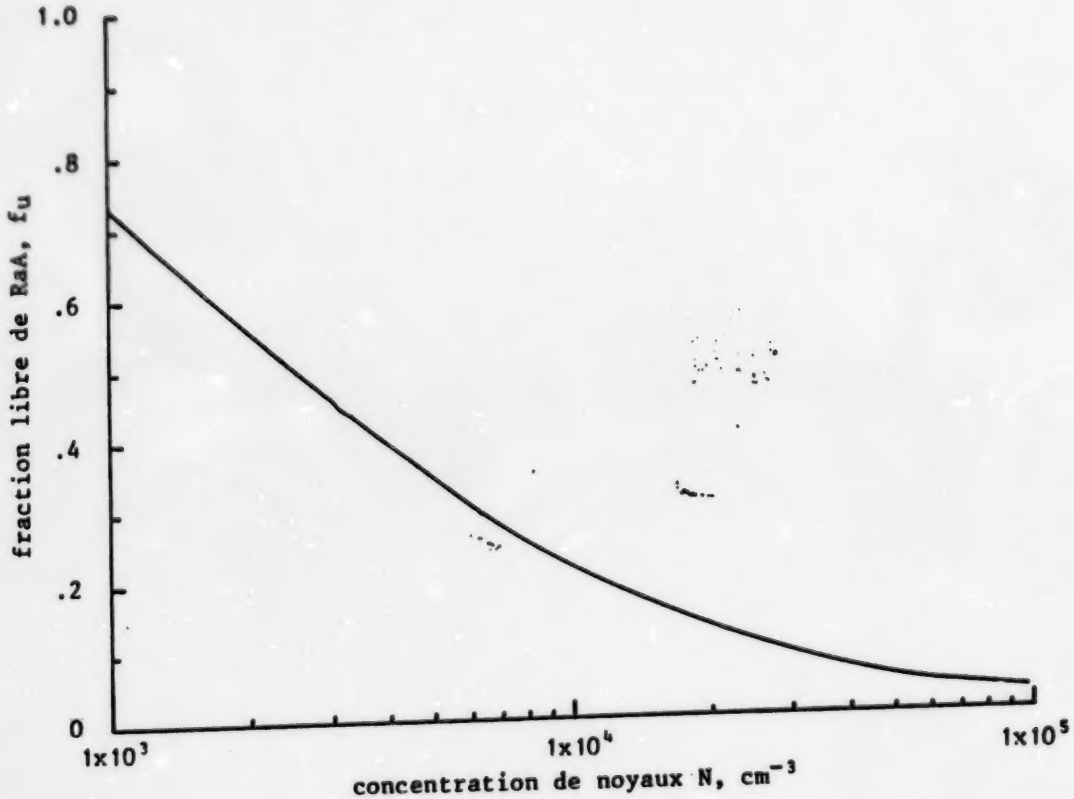

Fig. 4 - Fraction libre (théorique) de RaA en fonction de la concentration des noyaux de condensation (11).

forme libre ce qui implique que le niveau de travail restera pratiquement constant à partir de ce moment même si N continu d'augmenter. En examinant la fig. 3 on s'aperçoit en effet que pour des valeurs de N dépassant 7.0×10^3 cm^{-3} ou ne voit guère de changements au niveau du WL..

A la fig. 5 on voit les profils de concentration des produits de filiation du radon ainsi que celui de la concentration des noyaux de condensation pour ce qui est de l'essai no. 1. La concentration des descendants apparait en Bq/L et est calculée d'après la méthode Thomas-Tsivoglou (18). En examinant les profils de plus près on s'aperçoit qu'il arrive que la concentration du RaB et même que celle du RaC soit plus grande que [RaA]; ce qui semble à première vue être abnormal. Ceci est probablement du à un phénomène où le RaA a une plus grande affinité que le RaB ou RaC en ce qui concerne la fixation aux surfaces non-mobiles. Cette fixation sélective pourrait se produire au niveau des tubes de l'appareil d'échantillonage ou à la surface des murs de la chambre. De toute façon il est évident d'après la fig. 5 que l'addition de noyaux de condensation à un système tel que celui-ci a pour effet d'éliminer le phémomène 'abnormal' décrit plutôt.

Effet de l'humidité relative

La fig. 6 nous montre le WL et l'humidité relative (h.r.) en fonction du temps pour l'essai no. 3. On peut voir qu'il semble y exister un lien entre l'h.r. et le WL. L'acroissement du WL en même temps que l'h.r. peut être expliqué de la façon suivante:

1. Durant l'essai no. 3 la concentration des noyaux de condensation était d'environ 1.5×10^3 cm^{-3}, même si l'atomiseur n'était pas en marche. D'après Goetz (23) des tests fait par Orr démontrent que des aérosols d'NaCl augmentent de 3 à 5 fois en masse si l'h.r. passe de 70 à 90%. Il est donc possible que l'addition de vapeur d'eau ait pour effet de changer

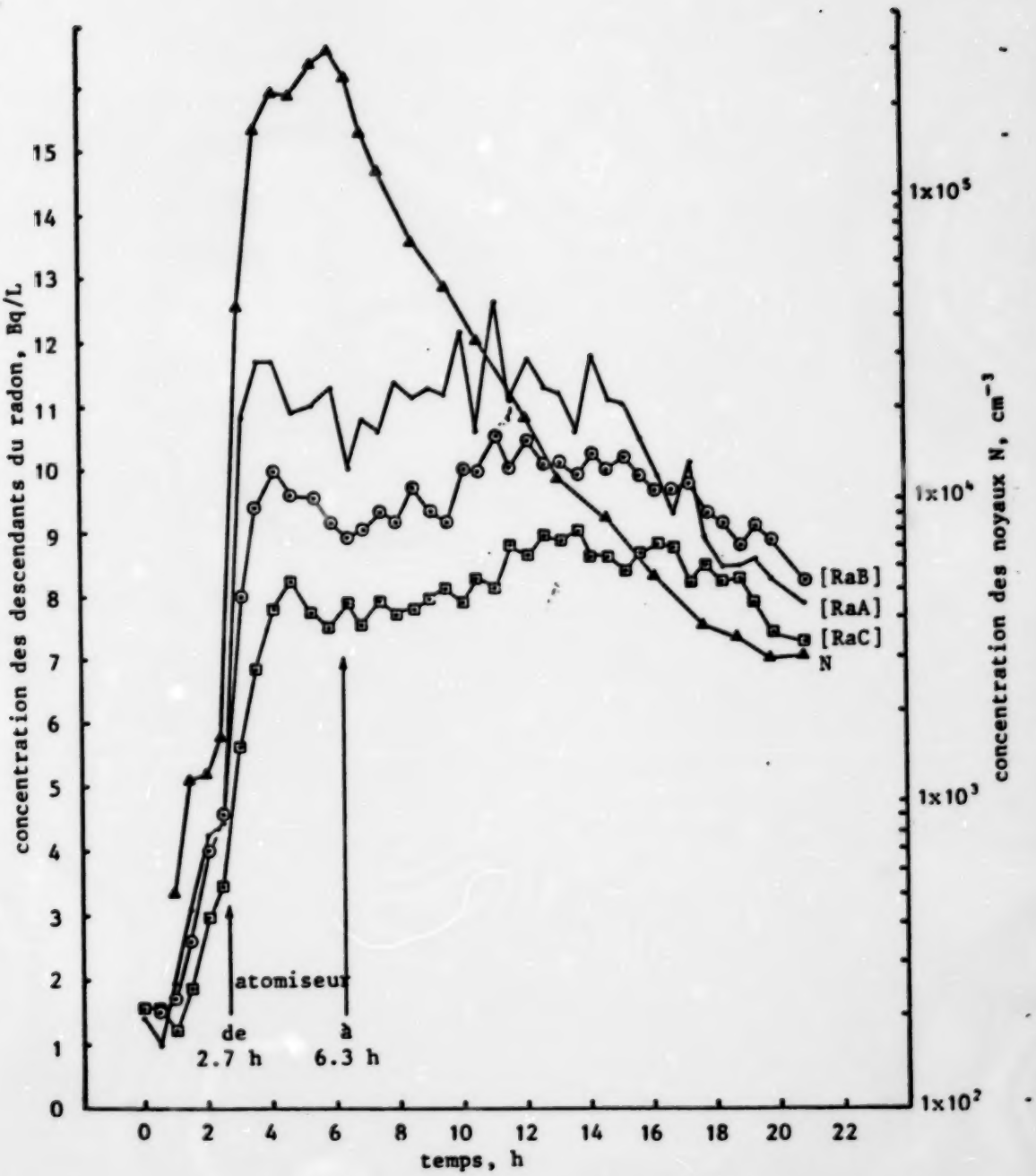

Fig. 5 - Concentration des descendants du radon [RaA], [RaB] et [RaC] ainsi que celle des noyaux de condensation en fonction du temps.

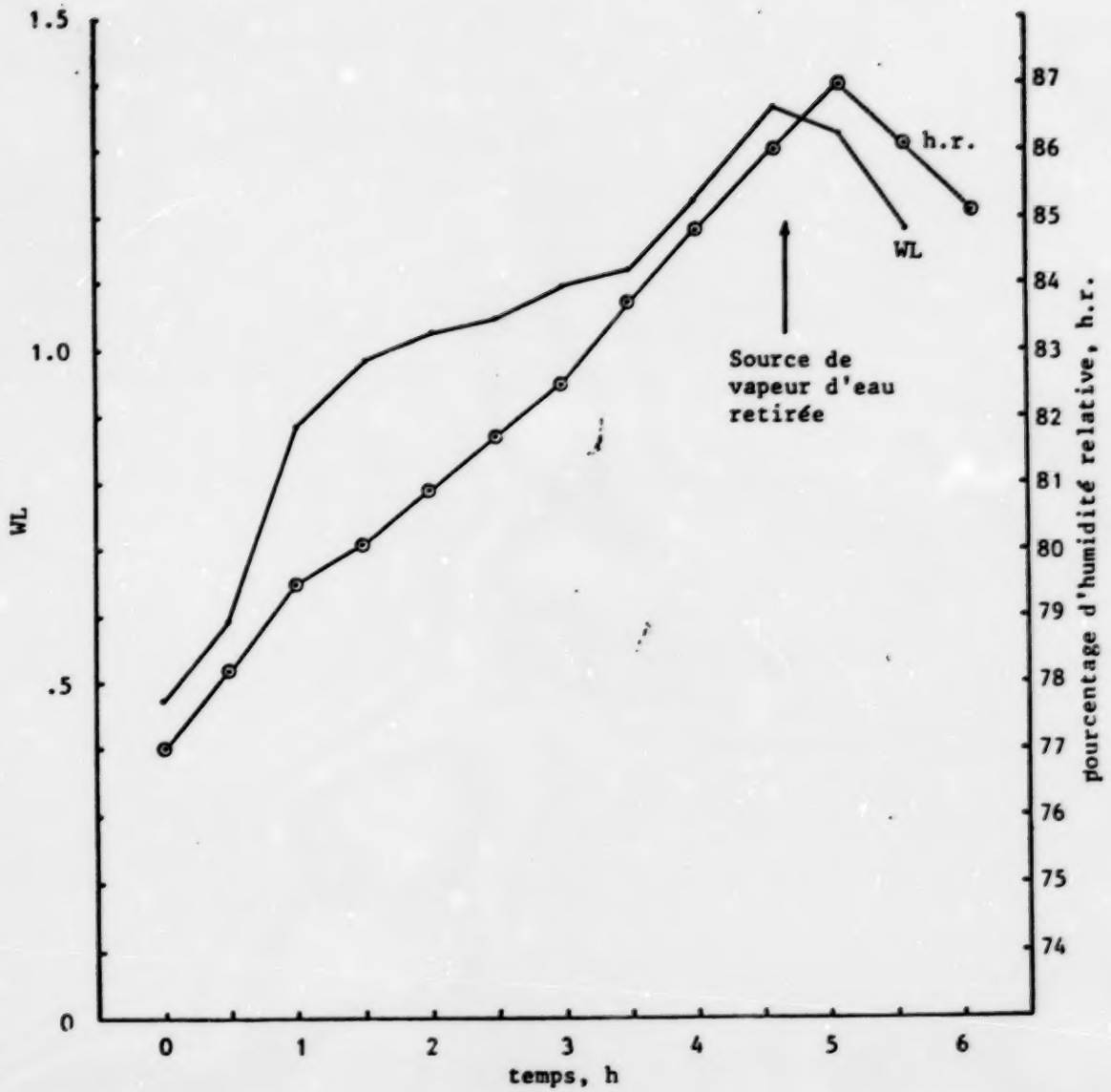

Fig. 6 - Niveau de travail (WL) et humidité relative (h.r.) en fonction du temps.

la masse d'aérosols hygroscopiques présents dans la chambre; ceci empêcherait les petits noyaux de s'attacher aux murs de la chambre en reduisant leurs coéfficients de diffusion.

2. Raabe (16) a observé une différence de 32% du coéfficient de diffusion du RaA dans des cas où le point de rosée est passé de -2.8°C à 5.6°C. Même si ces résultats ne sont pas tout à fait en accord avec ceux de Mercer et Stowe (6), Raabe explique qu'il peut exister une interaction polaire entre les ions de RaA et les molécules d'eau. Ceci aurait pour effet de réduire le coéfficient de diffusion du RaA, ce qui causerait une réduction du WL comme dans le cas de l'hypothèse no. 1.

Effet des changements de distribution granulométrique

Le tableau no. 2 résume certaines données des essais 2, 4, 5 et 6. Dans les quatres cas le WL est tabulé pour des valeurs de N se situant entre 3.0×10^4 et 3.8×10^4 cm^{-3}. Comme on l'a indiqué antérieurement, quand N dépasse 1.0×10^4 cm^{-3}, le WL est pratiquement indépendant de N. Pour cette raison nous avons tenté d'expliquer que cette nette différence de WL était due aux différences de diamètre moyen des noyaux de condensation présents dans l'atmosphère de la chambre. Pour ce faire nous avons du ajuster le WL pour tenir compte des différences de concentration du radon durant les differents essais. Le tableau no. 2 nous montre aussi les diamètres moyens (diamètre moyen aérodynamique de diffusion) tels que mesurés par la batterie de diffusion et déterminés à l'aide de la fig. 7 pour chaque cas. Il nous était possible de varier le diamètre des noyaux en changeant la concentration de la solution d'NaCl à atomiser.

La fig. 8 démontre la relation entre le WL et le diamètre moyen des noyaux utilisés. L'étendue de l'intervalle de mesure de la batterie de diffusion est limitée de .002 à .2 µm, pour cette raison il ne fut pas possible d'étudier

Tableau 2 - Données utilisées pour la construction du graphique à la figure no. 8.

Essai no.	WL	N ($x10^{-4}$ cm^{-3})	[Rn] (coups/min)	sol. NaCl (m mol/L)	Dia. moyen (µm)	WL*
2	2.62	3.26	206	17.110	.160**	3.82
4	2.48	3.03	220	1.711	.090±.025	3.38
5	2.19	3.80	300	0.171	.045±.018	2.19
6	1.97	3.30	290	0.017	.025±.012	2.04

* valeurs du WL corrigées pour tenir compte des différences de [Rn].

** cette valeur est extrapolée du graphique à la figure no. 7.

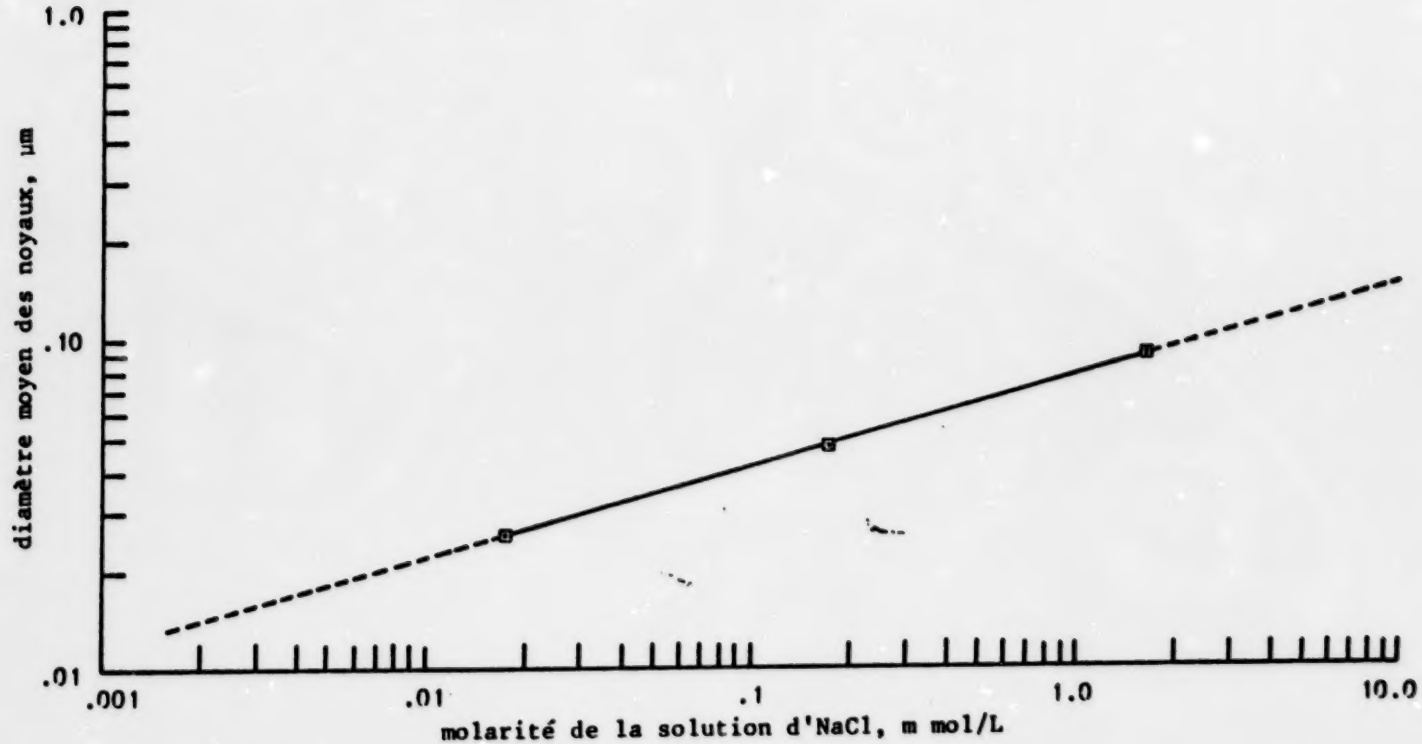

Fig. 7 - Diamètre moyen des noyaux de condensation en fonction de la molarité des solutions d'NaCl employées dans l'atomiseur.

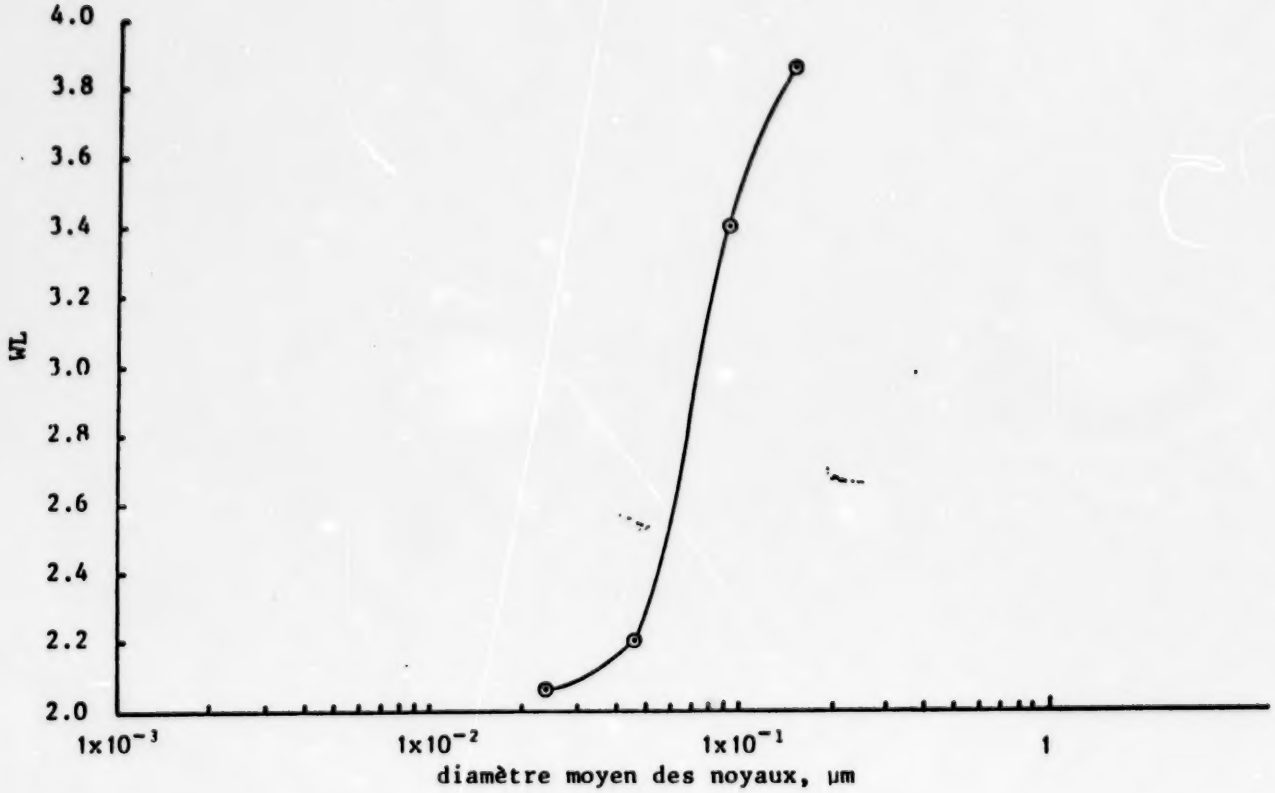

Fig. 8 - Niveau de travail (WL) en fonction du diamètre moyen des noyaux de condensation.

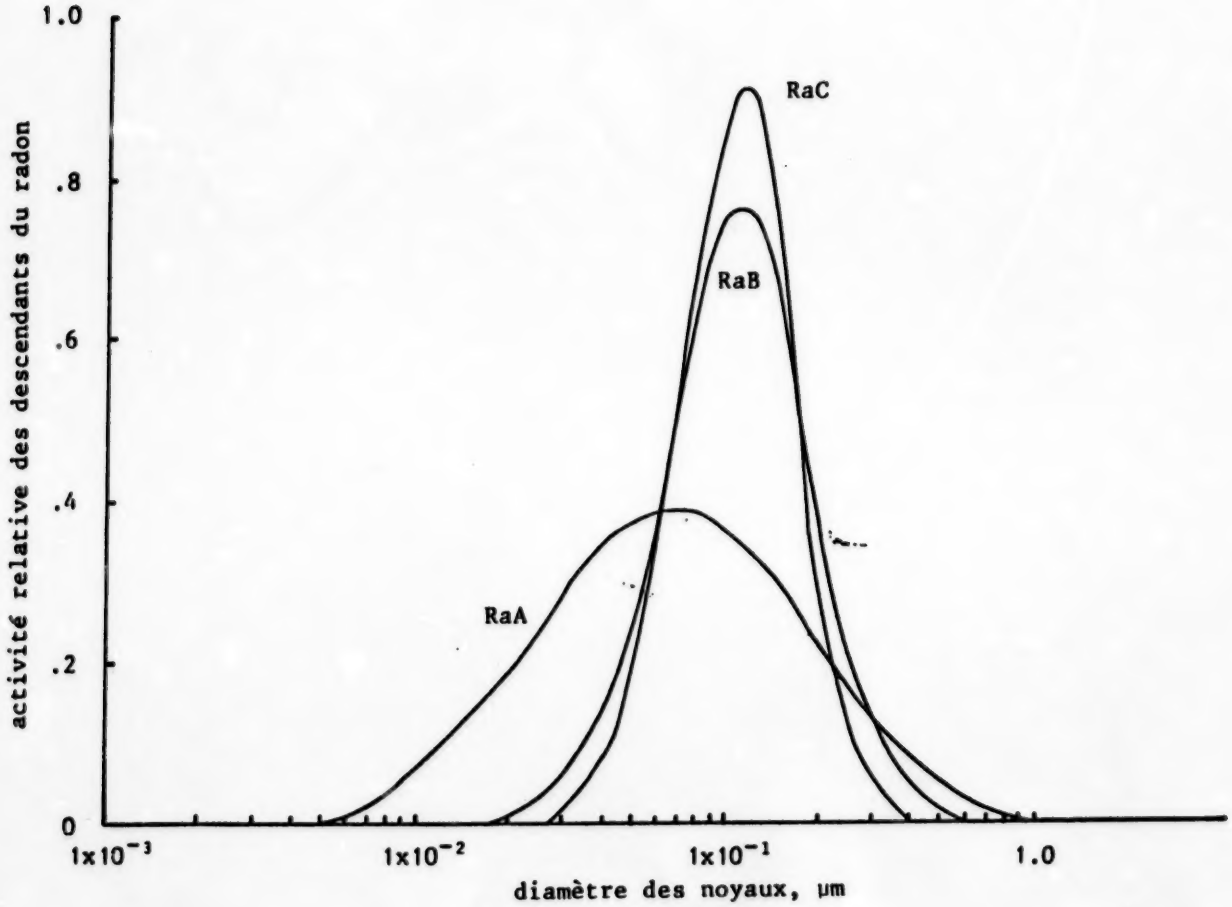

Fig. 9 - Spectre en taille des aérosols radioactifs d'une mine d'uranium.

la relation WL vs. N pour des valeurs de N supérieures à .16 µm. En dépit de cela on voit d'après la fig. 8 qu'il semble y avoir un maximum d'activité alpha (WL) dans l'intervalle entre .1 et .2 µm. Ceci est en excellent accord avec les données de la fig. 9 où on peut voir une distribution granulométrique typique d'une mine d'uranium (Busigin et al. d'après (11)).

CONCLUSION

Bien que l'analyse des données est relativement complexe, il est évident qu'il existe une relation entre le WL, la taille, la concentration des noyaux aussi bien qu'avec l'h.r. On a démontré que dans les cas décrits plus haut il existe une relation directe entre l'h.r. et le WL. Le phénomène naturel qui en est la cause reste cependant à élucider. Il devient donc possible de faire varier le WL de façon controllée en ajoutant de la vapeur d'eau au système. On a aussi remarqué que la concentration des noyaux de condensation avait un effet sur le WL qui variait en fonction de la fraction libre des descendants du radon. Finalement il semble que la majorité des aérosols radioactifs ont des diamètres se situant entre .1 et .2 µm.

BIBLIOGRAPHIE

1. Chamberlain, A.C. and Dyson, E.D., "The dose to the trachea and bronchi from the decay products of radon and thoron"; Br J Radiol, vol 211, p 317; 1956.

2. Raabe, O.G., "Measurement of the diffusion coefficient of radium A"; Nature, vol 217, p 1143; 1968.

3. Busigin, A., van der Vooren, A.W., Babcock, J.C. and Phillips, C.R., "The nature of unattached RaA (^{218}Po) particles"; Health Phys, vol 40, p 333; 1981.

4. Frey, G., Hopke, P.K. and Stukel, J.J., "Effects of trace gases and water vapor on the diffusion coefficient of Polonium-218"; Science, vol 211, p 480; 1981.

5. Holub, R.F. and Droullard, R.F., "Role of plate-out in radon daughter mixture distributions in uranium mine atmospheres"; Health Phys, vol 39, p 761; 1980.

6. Mercer, T.T. and Stowe, W.A., "Deposition of unattached radon decay products in an impactor stage"; Health Phys, vol 17, p 259; 1969.

7. Wrenn, M.E., Eisenbud, M. and Costa-Ribeiro, C., "Reduction of radon daughter concentrations in mines by rapid mixing without makeup air"; Health Phys, vol 17, p 405; 1969.

8. Shreve, J.D. Jr. and Cleveland, J.E., "Effects of depressing attachment ratio of radon daughters in uranium mine atmospheres"; Am Ind Hyg Assoc J, vol 33, p 304; 1972.

9. Holub, R.F., Droullard, R.F., Wu-Lieh Ho., Kopke, P.K., Parsley, R. and Stukel, J.J., "The reduction of airborne radon daughter concentration by plateout on an air mixing fan"; Health Phys, vol 36, p 497; 1979.

10. Holub, R.F., "Effects of an air moving fan on radon daughter plateout in the DMRC radon chamber"; in Proc Symp Radon Daughters Plate-Out Phenomena, University of Illinois, p 106; 1979.

11. Bigu, J., "The loss of radioactive decay products of radon and thoron in underground uranium mine environments"; Division Report MRP/MRL 81-73(J), CANMET, Energy, Mines and Resources Canada; 1981.

12. Bigu, J., "On the effect of a negative ion-generator and a mixing fan on the plate-out of radon decay products in a radon box"; Health Phys, vol 44, p 259; 1983.

13. Bigu, J., "The design of a radon/thoron calibration facility"; Division Report MRP/MRL 81-46(TR), CANMET, Energy, Mines and Resources Canada; 1981.

14. Duggan, M.J. and Howell, D.M., "The measurement of the unattached fraction of airborne RaA"; Health Phys, vol 17, p 423; 1969.

15. Madelaine, G., "Radioactive aerosols in uranium mines"; in Proc 8th Nat Congr on the Control of Ionizing Radiations, Chatenay-Malabry, France, p 203; 1973.

16. Raabe, O.G., "Concerning the interaction that occurs between radon decay products and aerosols"; Health Phys, vol 17, p 177; 1969.

17. Grenier, M.G. and Bigu, J., "Experimental procedures for the calibration of scintillation cells used in the determination of radon gas concentration"; Division Report MRP/MRL 82-24(TR), CANMET, Energy, Mines and Resources Canada; 1982.

18. Thomas, J.W., "Measurement of radon daughters in air by alpha counting of air filters"; Health and Safety Laboratory, U.S. Atomic Energy Commission; HASL-256; 1972.

19. Kusnetz, H.L., "Radon daughters in mine atmospheres"; Am Ind Hyg Assoc J, vol 17, p 1; 1956.

20. Duggan, M.J. and Howell, D.M., "Relationship between the unattached fraction of airborne RaA and the concentration of condensation nuclei"; Nature, vol 224, p 1190; 1969.

21. van der Vooren, A.W., Busigin, A. and Phillips, C.R., "An evaluation of unattached radon (and thoron) daughter measurement techniques"; Health Phys, vol 42, p 801; 1982.

22. Jacobi, W., "Activity and potential α-energy of 222-radon and 220-radon daughters in different air atmospheres"; Health Phys, vol 22, p 441; 1972.

23. Goetz, A., "The physics of aerosols in the submicron range"; in: Inhaled Particles and Vapours; C.N. Davies (Ed); pp 295-301; Pergamon Press, Oxford; 1961.